

激光与光电子学进展

预热温度对激光熔覆层组织和应力的影响

李洪玉^{1,2**}, 魏连峰¹, 王泽明¹, 陈辉^{2*}, 郑娜¹, 张恒泉¹

¹中国核动力研究设计院, 四川 成都 610213;

²西南交通大学材料科学与工程学院, 四川 成都 610031

摘要 激光熔覆层的组织和应力对熔覆层的裂纹控制具有重要影响, 而熔覆层的组织和应力与熔覆过程中的预热温度密切相关。本文在铸钢基体表面激光熔覆铁基粉末制备了熔覆层, 分析了不同预热温度下熔覆层的组织和应力分布规律。结果表明: 预热温度越高, 熔覆层与基体之间的元素相互作用越强; 当预热温度为 100 °C 时, 熔覆层中的应力峰值明显降低, 平行于扫描方向的残余应力峰值从室温时的 594 MPa 减小到 442 MPa, 垂直于扫描方向的残余应力峰值从室温时的 579 MPa 减小到 383 MPa; 当预热温度为 200 °C 时, 应力的降低效果显著减弱; 当预热温度为 300 °C, 与常温相比, 组织应力的影响较大, 导致残余应力水平显著提高。

关键词 激光技术; 激光熔覆; 预热温度; 残余应力分布; 微观组织

中图分类号 TG174.4

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0714004

Effect of Preheating Temperature on Microstructure and Stress of Laser Cladding Layer

Li Hongyu^{1,2**}, Wei Lianfeng¹, Wang Zeming¹, Chen Hui^{2*}, Zheng Na¹, Zhang Hengquan¹

¹Nuclear Power Institute of China, Chengdu, Sichuan 610213, China;

²School of Materials Science and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China

Abstract The microstructure and stress of the laser cladding layer have a significant impact on crack control of the cladding layer. The microstructure and stress of the cladding layer are closely related to preheating temperature during the cladding process. The microstructure and stress distribution of the cladding layer under different preheating temperatures are analyzed. The results show that the higher the preheating temperature, the stronger is the element interaction between the cladding layer and matrix. At a preheating temperature of 100 °C, the peak value of the transverse residual stress decreases. The peak value of the residual stress parallel to the scanning direction decreases from 594 MPa at room temperature to 442 MPa, and that perpendicular to the scanning direction decreases from 579 MPa at room temperature to 383 MPa. Besides, when the preheating temperature is 200 °C, the stress reduction effect significantly reduced. When the preheating temperature is 300 °C, the microstructure stress effect is greater than that of room temperature, resulting in a significant increase in residual stress level.

Key words laser technique; laser cladding; preheating temperature; residual stress distribution; microstructure

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 350.3390

收稿日期: 2020-07-21; 修回日期: 2020-08-30; 录用日期: 2020-09-03

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB1100202)

*E-mail: xnrpt@163.com; **E-mail: Lhy0111@outlook.com

1 引言

近年来,激光增材制造技术以其高精度、低成本、高效率、可成形复杂零件等优点成为国内外研究的热点。激光熔覆技术作为激光增材制造的典型代表之一,主要被应用于工件表面强化和再制造修复两方面。在不影响基体材料的前提下,激光熔覆可以在基体表面形成性能优良的合金熔覆层,从而降低了生产成本,提高了效率,并节约了贵金属、稀有金属材料的使用,在现代工业中具有巨大的潜力和广阔的应用前景^[1-2]。与传统的涂层制备技术相比,激光熔覆具有稀释率低、能量密度高、结合性能好和污染小等优点^[3]。

激光熔覆是一个快速冷却和快速加热的过程。基体预热温度会大大降低熔覆层的冷却速度,进而影响熔覆层的组织和应力分布。国内外学者对此进行了很多研究。Ren等^[4]采用有限元法(FEM)建立了基于Ti-6Al-4V合金的激光熔覆模型,并选择三种不同的扫描路径计算熔覆层的应力;他们发现,尖顶扫描路径是最小化熔覆层热应力的最佳方法,数值模拟结果为优化钛合金激光熔覆工艺提供了理论指导。Alam等^[5]研究了激光熔覆工艺参数对AISI 420钢组织和应力的影响,结果显示:拉应力主要分布在表面和熔覆区域上部以及热影响区,剩余的熔覆区和稀释区主要表现为压应力;在565℃下进行1h的热处理能显著降低表面及其下方的拉应力。Farahmand等^[6]利用试验和数值模拟的方法研究了单层多道激光熔覆的温度场演化、熔池尺寸和应力-应变场,结果表明:熔覆层中存在高的拉伸残余应力集中,而压缩残余应力存在基底及热影响区中;在多道激光熔覆过程

中,由于应力在熔覆过程的循环加热和冷却作用下得到释放,因此先前沉积的熔覆层的残余应力水平相对较低。他们认为,较慢的扫描速度会导致较高的热输入,从而导致更大和更宽的熔池,使得纵向和横向残余应力更大。Jendrzewski等^[7]对双层激光熔覆的温度场、应力和应变进行数值模拟计算后发现:对于未预热基底上的涂层,计算的应力、应变在两层中都明显超过了SF6的抗拉强度和延伸率,且在涂层中发现了裂纹;而在将基底预热至600℃的情况下,应力和应变的计算值低于SF6的抗拉强度和延伸率,因此预热基体的微裂纹敏感性较小。Cottam等^[8]采用激光熔覆工艺在Ti-6Al-4V基底上制备了Ti-6Al-4V涂层,研究了熔覆速率对熔覆层中残余应力的影响;他们采用轮廓法测量残余应力,结果发现采用不同速率熔覆的涂层中的残余应力分布是相似的,并且从熔覆层到热影响区,拉伸应力的变化较小。

通过文献调研发现,目前国内外大多通过数值模拟研究预热温度对激光熔覆层组织和应力的影响,很少有人通过试验开展这方面的研究,而数值模拟分析存在较大的局限性。因此,本文基于不同的预热温度,对熔覆层的组织和应力分布规律进行了较为详细的试验研究,以期对熔覆层的裂纹控制及工艺优化提供参考。

2 试验材料与方法

2.1 试验材料

激光熔覆基体材料为铸钢材料,熔覆粉末采用赫格纳斯(中国)有限公司生产的铁基商用粉,牌号为Lc-Sr-31。基体材料和熔覆粉末的化学成分如表1^[9]所示。

表1 基体材料及Lc-Sr-31铁基粉末的化学成分

Table 1 Chemical composition of matrix material and Lc-Sr-31 iron-based powder

Material	Mass fraction /%								
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	P	S	Fe
Matrix	0.34	0.26	0.67	0.97	0.02	0.16	0.011	0.004	Bal.
Lc-Sr-31	0.18	0.92	0.11	16.8	1.83	1.95	0.006	0.015	Bal.

图1所示为Lc-Sr-31铁基熔覆粉末的微观形貌。粉末颗粒大多呈棒状或椭球状,粒度为45~160 μm,松装密度为3.5~5.0 g/cm³。粉体密封保存在干燥的环境中,使用前置于保温炉中在80~90℃下进行恒温保温处理,保温时间为40 min,以降低其中的水分含量。

2.2 试验方法

试验所用激光器为IPG公司生产的YLS-4000型

光纤激光器,激光波长为1064 nm,最大输出功率为4 kW。数控机床带动熔覆喷嘴完成激光头的扫描,试验中选用的是DF-5000型送粉器,通过调节电机电压进而控制电机转速,达到控制送粉量的目的。保护气选用纯度为99.999%的高纯氩气。采用同轴送粉的方式进行多层多道激光熔覆,熔覆功率为2000 W,送粉速率为15 g/min,送粉载气流量为3.5 L/min,扫描速度为280 mm/min,搭接率为

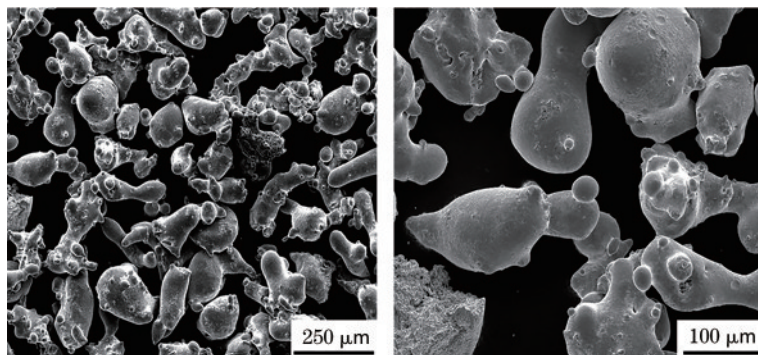


图 1 Lc-Sr-31 粉体的微观形貌

Fig. 1 Morphologies of Lc-Sr-31 powder

30%。熔覆过程示意图如图 2 所示。预热板置于基体下方,通过调节预热板的温度控制基体的预热温度。

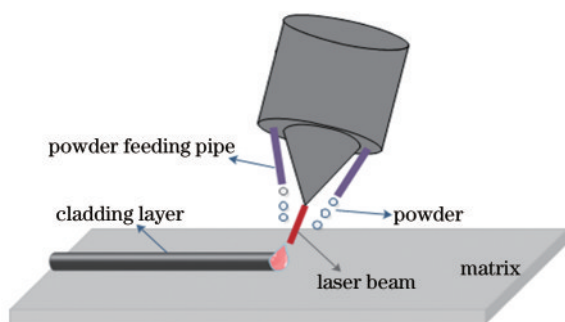


图 2 同轴送粉激光熔覆过程示意图

Fig. 2 Schematic of coaxial powder feeding laser cladding process

在基板上进行多层多道激光熔覆,熔覆尺寸为 50 mm×50 mm,共熔覆 4 层,熔覆之后去除表面的凹凸坑并保证剩余熔覆层高度为 2 mm,然后采用电解抛光去除加工应力层。共测试 25 个点的应力值,每两个点之间的间距为 10 mm,每个点测试两个方向的应力,沿着扫描方向的应力记为 X 方向应力,垂直于扫描方向的应力记为 Y 方向应力,具体示意图如图 3 所示。残余应力测试是本文的重点,其准确程度直接影响试验结果的分析。本文采用 μ 360 X 射线测试仪进行残余应力测试,该测试仪利用 X 射线穿透金属晶格时发生衍射的原理,测量金属材料或构件表面层由晶格间距变化引起的应变,从而计算出应力。根据铁基材料的性质,本文选择的测试角度为 30°,靶材选择铬靶。

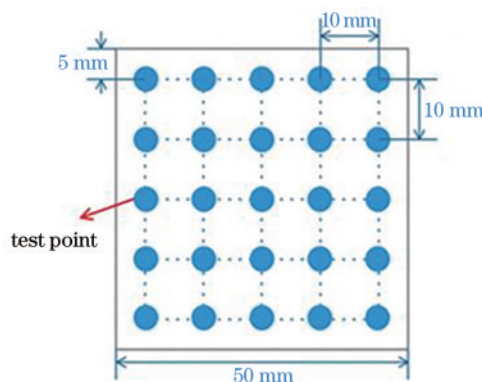
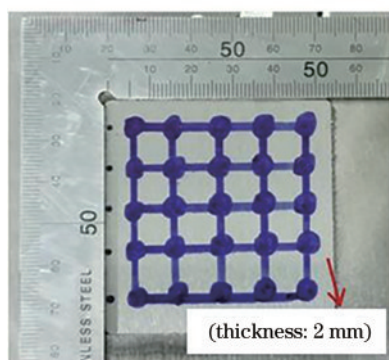


图 3 熔覆层残余应力测试图。(a)实物图;(b)示意图

Fig. 3 Test diagrams of residual stress of cladding layer. (a) Photo; (b) schematic

3 试验结果与讨论

3.1 预热温度对熔覆层组织的影响

图 4(a)、(b)显示了室温(未预热)和 300 °C 预热温度下熔覆层的微观组织。在 300 °C 预热温度下,随着热输入的增加,温度梯度减小,枝晶凝固时间变长,

组织变得粗大。图 5(a)、(b)为熔覆层的能谱分析,可见,在 300 °C 的预热温度下,铬元素和钼元素在晶界处严重偏析。这说明在 300 °C 的预热温度下,熔覆层的过冷度降低,冷却速度降低,原子扩散能力增强,晶核有足够的时间长大,导致枝晶组织较为粗大。

以上分析表明,在 300 °C 的预热温度下,由于热

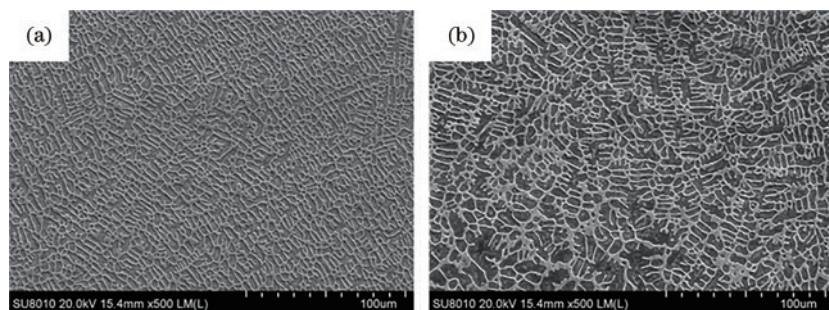


图 4 熔覆层的微观组织。(a)未预热;(b)300 °C预热温度

Fig. 4 Microstructures of cladding layer. (a) Without preheating; (b) 300 °C preheating temperature

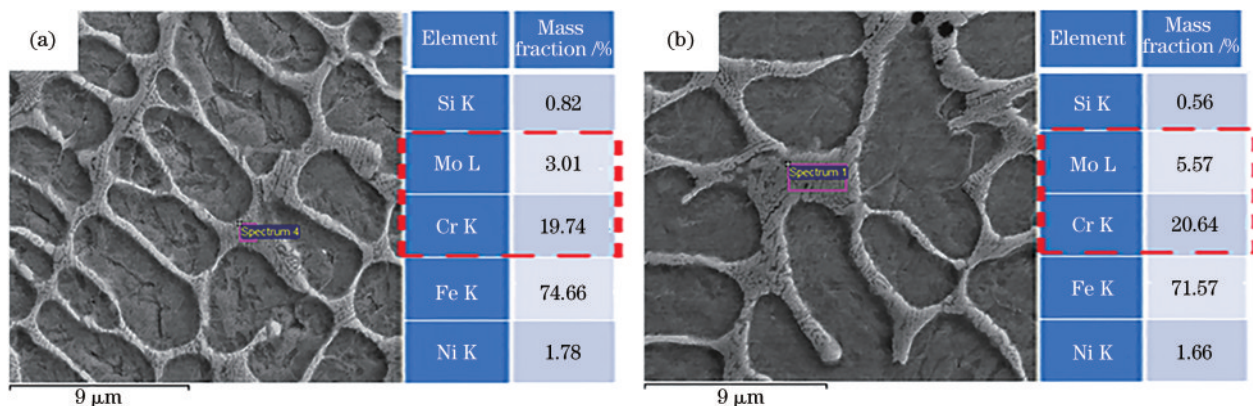


图 5 熔覆层的能谱分析。(a)未预热;(b)300 °C预热温度

Fig. 5 Energy spectrum analysis of cladding layer. (a) Without preheating; (b) 300 °C preheating temperature

输入的增加以及冷却速度的降低,熔覆层中原子的扩散能力增强。据此推测熔覆层与母材之间的元素扩散也会更强,因此,本文对熔覆层截面进行了EDS(energy dispersive spectrometer)线扫描,结果如图6和图7所示。

熔覆层中的铁、碳含量低于基体,而铬、钼等合金含量高于基体,因此,在熔覆过程中,基体中的铁、碳元素倾向于向熔覆层扩散,而熔覆层中的铬、钼等元素倾向于向基体扩散。由于能谱仪对碳元素含量的测量不太准确,粉体及母材中的钼等合金元素含量相

对较低,因此,本文将熔覆层及基体中铁元素含量的变化趋势与碳元素含量的变化趋势进行了类比,将熔覆层及基体中铬元素含量的变化趋势与钼等合金元素的变化趋势进行了类比。从线扫描的结果中可以看出:未预热时,熔覆层中的铁、铬等元素分布得较为均匀,只是在界面处存在较为明显的含量变化,说明常温下元素的交互作用并不显著;而在预热温度为300 °C时,熔覆层中的铁元素含量存在明显的升高趋势,而铬元素存在明显的降低趋势,说明在较高的预热温度下,基体与熔覆层的元素交互作用更加剧烈。

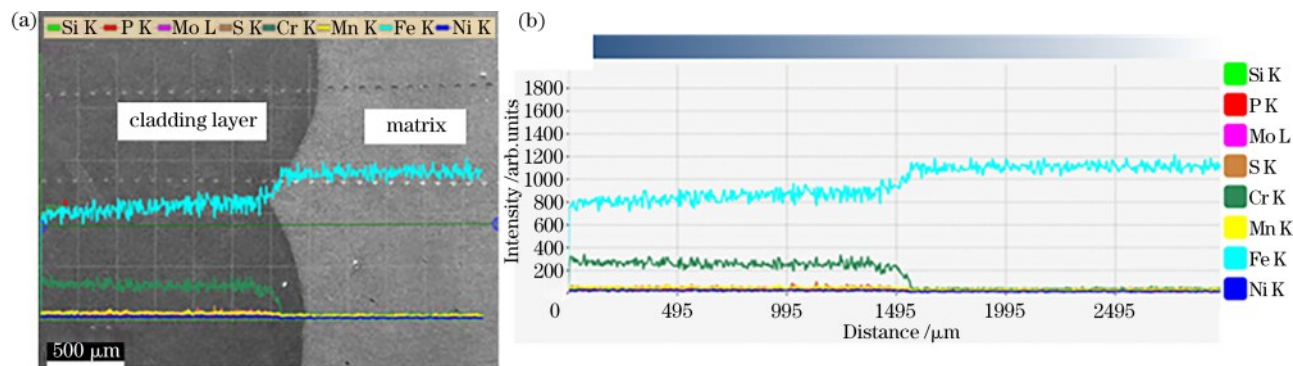


图 6 未预热熔覆层截面的EDS线扫描。(a)线扫描图;(b)元素强度变化

Fig. 6 EDS line scanning of cladding layer without preheating. (a) Line scanning diagram; (b) element intensity change

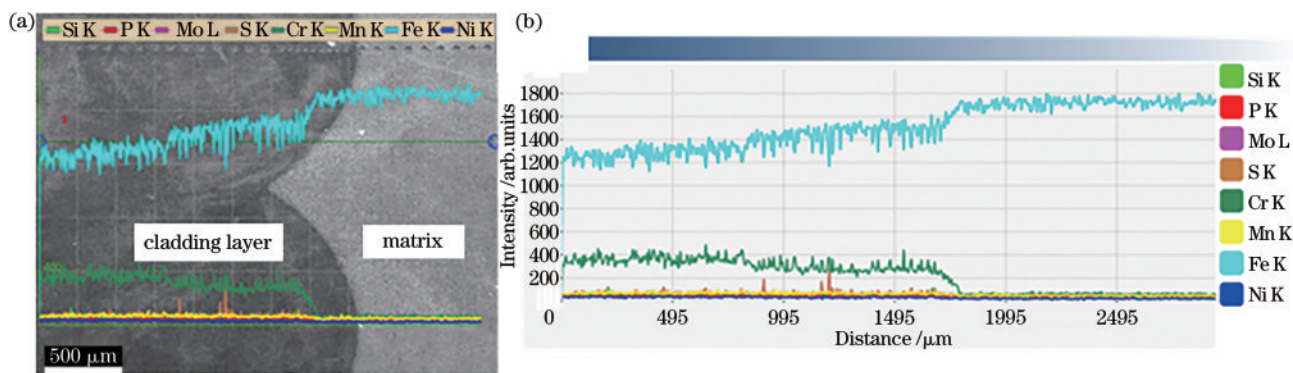


图 7 300 °C 预热温度下熔覆层截面的 EDS 线扫描。(a) 线扫描图; (b) 元素强度变化

Fig. 7 EDS line scanning of cladding layer with 300 °C preheating temperature. (a) Line scanning diagram; (b) element intensity change

本文进一步分析了未预热和 300 °C 预热温度下熔覆层的显微组织,如图 8 和图 9 所示。在激光熔覆的快热快冷过程中,凝固过程为非平衡凝固,碳易与铬、钼等元素形成 M_7C_3 、 $M_{23}C_6$ 等碳化物。从图 8 和图 9 可以发现未预热以及 300 °C 预热温度下

的熔覆层中均存在此类碳化物。随着 300 °C 预热温度下熔覆层中碳含量的增加以及凝固时间的延长,在熔覆层组织的晶界处形成了较常温下更多的条状共晶 M_7C_3 相,如图 9 所示,导致组织存在更为严重的元素偏析。

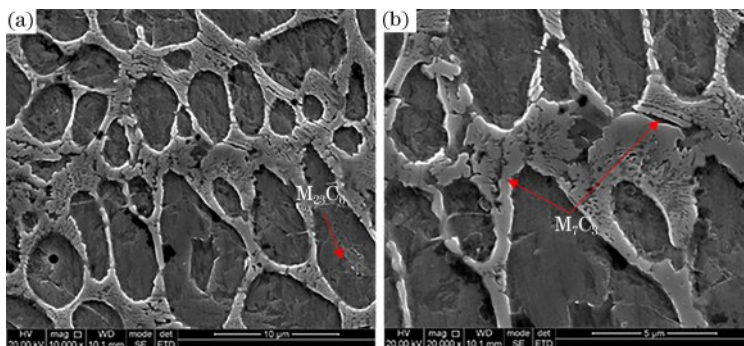


图 8 未预热的熔覆层的显微组织。(a) $M_{23}C_6$ 相; (b) M_7C_3 相

Fig. 8 Microstructures of cladding layer without preheating. (a) $M_{23}C_6$ phase; (b) M_7C_3 phase

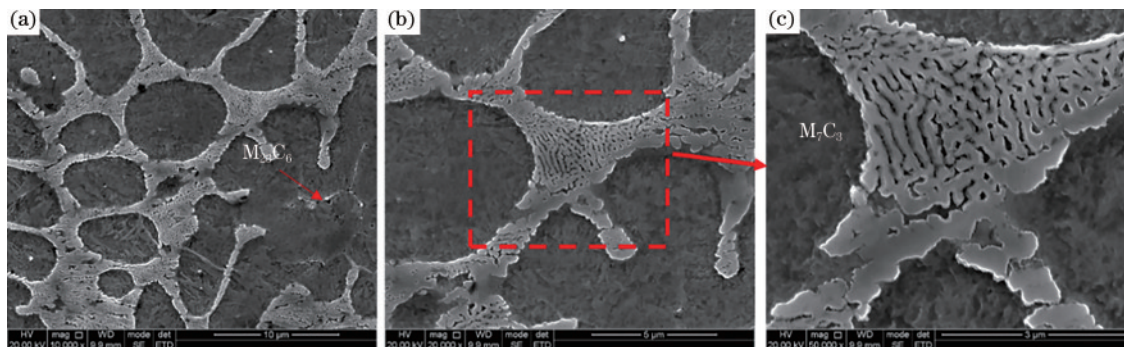


图 9 300 °C 预热温度下熔覆层的显微组织。(a) $M_{23}C_6$ 相; (b)(c) M_7C_3 相

Fig. 9 Microstructures of cladding layer with 300 °C preheating temperature. (a) $M_{23}C_6$ phase; (b) (c) M_7C_3 phase

3.2 预热温度对熔覆层显微硬度的影响

图 10 为不同预热温度下熔覆层截面的显微硬度变化曲线。从图中可以看出,热影响区的硬度最低,且预热温度越高,热影响区的整体显微硬度水

平越低,而熔覆层在靠近基体区域的硬度随着预热温度的升高而升高。

由上面的组织分析可知,300 °C 的预热温度最直接的影响就是降低了激光熔覆熔化金属的冷却

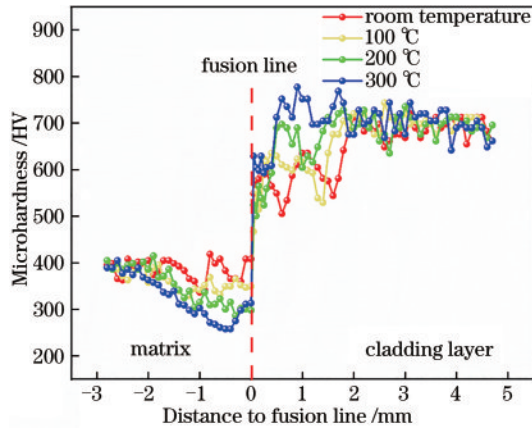


图 10 不同预热温度下载面的显微硬度
Fig. 10 Microhardness of cross-section with different preheating temperatures

速度,为金属碳化物 M_7C_3 、 $M_{23}C_6$ 等提供了较长的析出时间,而 M_7C_3 与 $M_{23}C_6$ 属于硬质相,能够显著提高合金的硬度^[10-11]。基体中的 C 元素在较高预热温度下向熔覆层中扩散得较多,导致热影响区的硬度降低,且热影响区宽度在 300 °C 预热温度下明显变宽。在室温与 100 °C 预热温度下,热影响区距熔合线较近位置处的显微硬度明显上升,这是由于在激光熔覆快热快冷的作用下,热影响区发生了马氏体相变,如图 11 所示。而较高的预热温度减缓了冷却速度,因此在 200 °C 和 300 °C 预热温度下的热影响区中并未发现明显的马氏体组织。

3.3 预热温度对熔覆层中残余应力的影响

图 12~14 为预热温度对熔覆层残余应力的影响。由图 12~14 可知:预热温度为 100 °C 时,应力峰值明显降低(与未预热时相比),X 方向的应力峰值由室温时的 594 MPa 降到 442 MPa, Y 方向的应力峰值由未预热时的 579 MPa 降到 383 MPa;预热温度为 200 °C 时,应力的降低效应相比于 100 °C 预热温度下有所减弱, X 方向的应力峰值由未预热时的 594 MPa 降到 498 MPa, Y 方向的应力峰值由室温时的 579 MPa 降到 555 MPa,同时,应力分布规律发生了改变,由原来的应力峰值出现在左侧区域变为出现在右侧区域;预热温度为 300 °C 时,残余应力水平相比于未预热时明显升高,且应力峰值更加明显地出现在了右侧区域。造成此种结果的原因如下:升高预热温度可以降低熔池的冷却速度,但同时也会使熔池的最高温度升高;当预热温度较低时,降低熔池冷却速度的效应高于升高熔池最高温度的效应,最终使得熔覆层中的残余应力显著降低;当预热温度过高时,熔池最高温度急剧升高,当熔覆结束时,熔覆过程能量的不断输入以及过高的预热温度使得熔覆层的整体温度过高,而空冷状态下的冷却速度较大,因此熔覆层中的残余应力升高。此外,熔覆层内的残余应力主要由热应力、拘束应力与组织应力构成。激光熔覆过程中的加热与冷却速度极快,在凝固过程中必然发生组织转变,不同

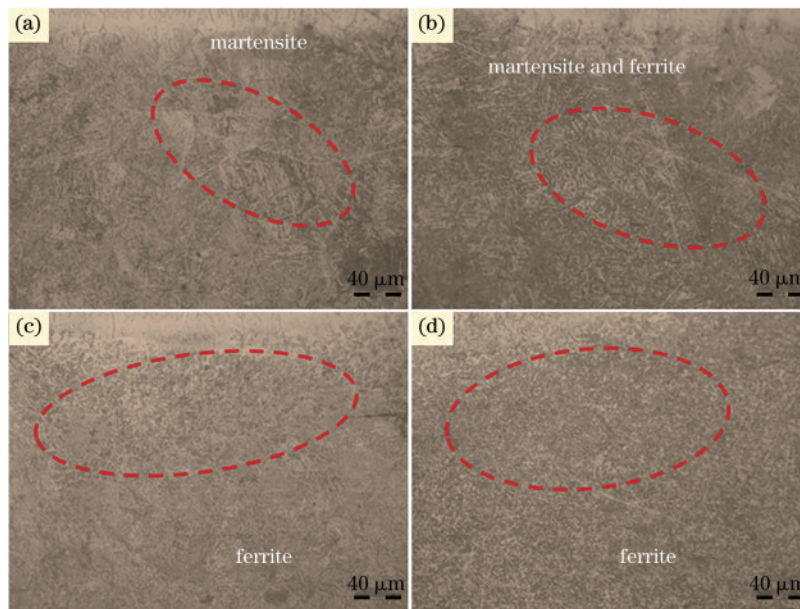


图 11 不同预热温度下热影响区的显微组织。(a)未预热;(b) 100 °C 预热温度;(c) 200 °C 预热温度;(d) 300 °C 预热温度
Fig. 11 Microstructures of heat affected zone with different preheating temperatures. (a) Without preheating; (b) 100 °C preheating temperature; (c) 200 °C preheating temperature; (d) 300 °C preheating temperature

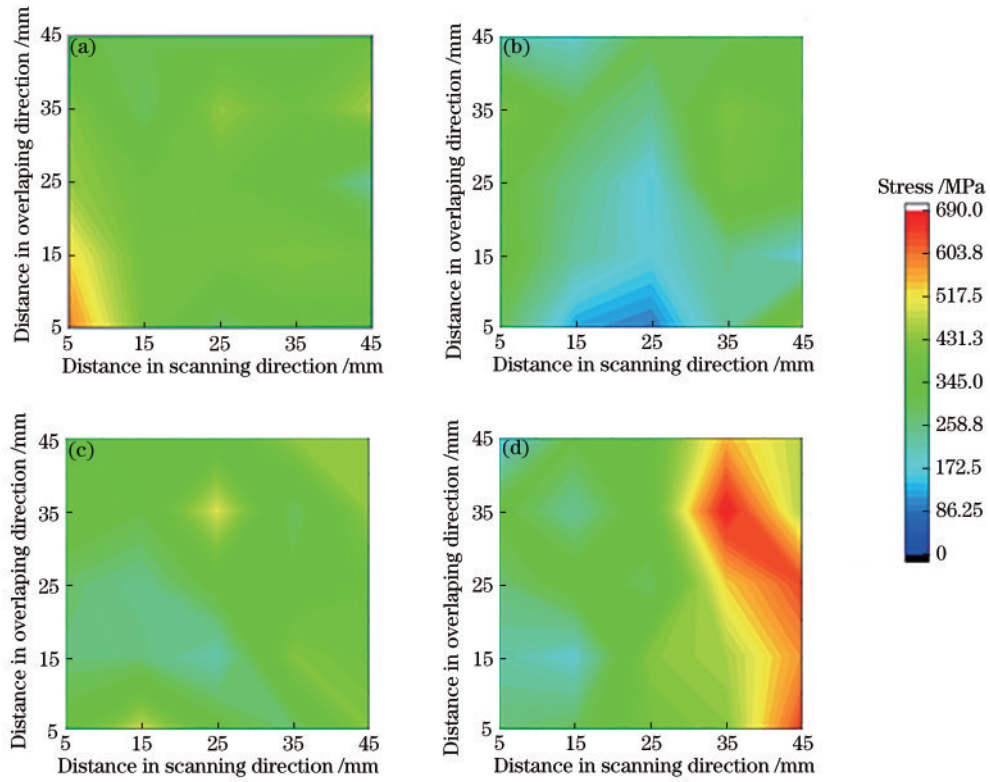


图 12 预热温度对 X 方向残余应力的影响。(a) 未预热; (b) 100 °C; (c) 200 °C; (d) 300 °C

Fig. 12 Effect of preheating temperature on residual stress in X direction. (a) Without preheating; (b) 100 °C; (c) 200 °C; (d) 300 °C

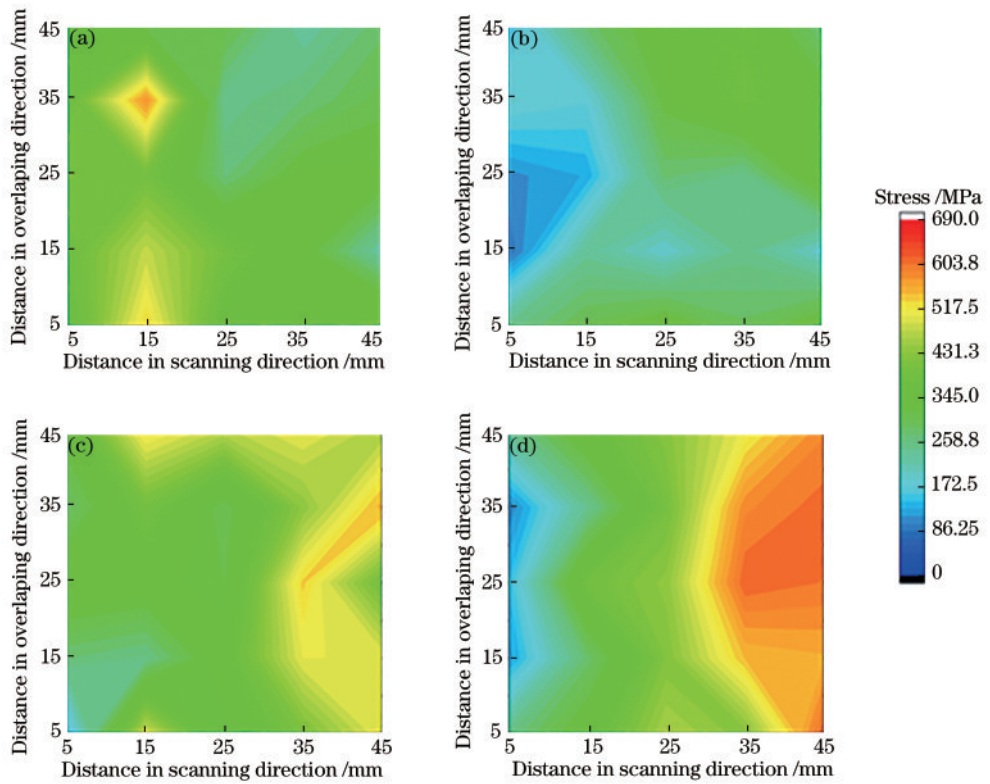


图 13 预热温度对 Y 方向残余应力的影响。(a) 未预热; (b) 100 °C; (c) 200 °C; (d) 300 °C

Fig. 13 Effect of preheating temperature on residual stress in Y direction. (a) Without preheating; (b) 100 °C; (c) 200 °C; (d) 300 °C

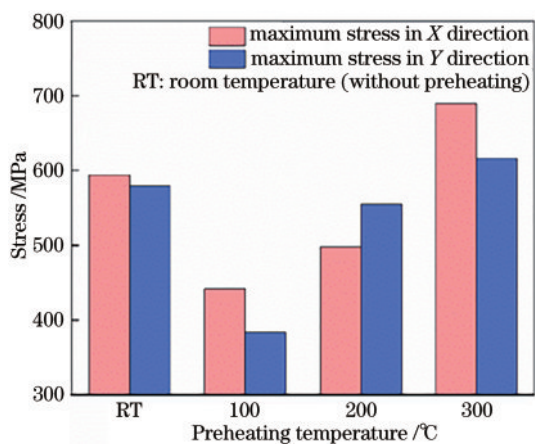


图 14 不同预热温度下的应力

Fig. 14 Stress at different preheating temperatures

组织的晶格结构与体积存在差异,从而会产生组织应力。由固态相变理论可知,组织转变的重要影响因素是冷却速度^[12]。当预热温度较低时,熔覆过程的冷却速度极快,会发生马氏体相变;而当温度较高时,由于冷却速度大大降低,马氏体转变不充分。由图 15 所示的未预热与 300 °C 预热温度下的 X 射线衍射(XRD)图可以看出,在 300 °C 预热温度下,马氏体衍射峰强度显著降低,并伴有奥氏体衍射峰出现。马氏体转变会导致体积膨胀,从而使熔覆层内的残余拉应力有减小的趋势^[13]。因此,当预热温度较高时,组织应力的影响较大,并最终导致熔覆层内的应力峰值较高。

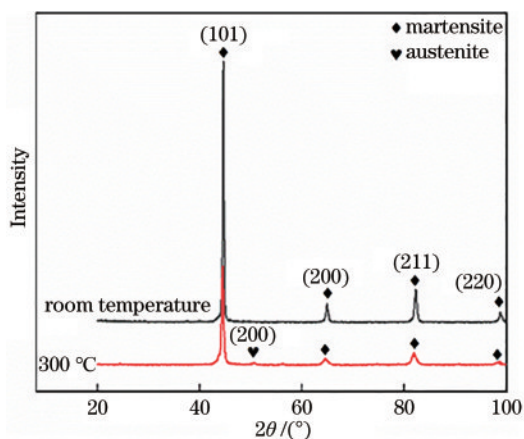


图 15 未预热和 300 °C 预热温度下的 XRD 谱

Fig. 15 XRD at room temperature and 300 °C preheating temperature

4 结 论

本文采用激光熔覆技术在铸钢表面熔覆了 Lc-Sr-31 铁基粉末,详细比较了不同预热温度下熔

覆层的组织及应力分布特点。本文可得出以下结论:

1) 预热温度对熔覆层组织有很大影响。相比于常温,在 300 °C 预热温度下,基体与熔覆层之间存在较强的元素扩散,熔覆层过冷度降低,冷却速度降低,晶核在凝固过程中有充分的时间长大,导致枝晶变得粗大。

2) 在 300 °C 预热温度下,基体中含量较高的铁、碳元素扩散到熔覆层中,形成了 M_7C_3 和 $M_{23}C_6$ 硬质相,导致熔覆层的显微硬度升高;同时,高的预热温度降低了热影响区的冷却速度,导致热影响区中存在马氏体-铁素体转变。

3) 100 °C 的预热温度既可以降低熔池的冷却速度,又不至于产生过大的组织应力,降低熔覆层残余应力的效果最佳;随着预热温度升高,熔覆层中的残余应力逐渐由组织应力为主,同时冷却速度大大降低,马氏体转变不充分,熔覆层中的残余应力增大。

参 考 文 献

- [1] Santos E C, Shiomi M, Osakada K, et al. Rapid manufacturing of metal components by laser forming [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2006, 46(12/13): 1459-1468.
- [2] Zhang K, Liu W J, Shang X F. Research on the processing experiments of laser metal deposition shaping [J]. Optics & Laser Technology, 2007, 39(3): 549-557.
- [3] Liu J. Study on dual-layer temper technique for laser cladding repair of P20 mold steel [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2013.
刘京. P20 模具钢的双层回火激光熔覆修复技术研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2013.
- [4] Ren Z, Tian Y L, Zhou M Y, et al. Effect of scanning path on the thermal stress of titanium alloy in the laser cladding [J]. Advanced Materials Research, 2011, 418/419/420: 1538-1541.
- [5] Alam M K, Edrisy A, Urbanic J, et al. Microhardness and stress analysis of laser-cladded AISI 420 martensitic stainless steel [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2017, 26(3): 1076-1084.
- [6] Farahmand P, Kovacevic R. An experimental-numerical investigation of heat distribution and stress field in single and multi-track laser cladding by a high-power direct diode laser [J]. Optics & Laser Technology, 2014, 63: 154-168.
- [7] Jendrzejewski R, Śliwiński G, Krawczuk M, et al.

- Temperature and stress during laser cladding of double-layer coatings [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2006, 201(6): 3328-3334.
- [8] Cottam R, Thorogood K, Lui Q, et al. The effect of laser cladding deposition rate on residual stress formation in Ti-6Al-4V clad layers [J]. *Key Engineering Materials*, 2012, 520: 309-313.
- [9] Ma Y M. Research on laser cladding process and performance of brake disc material for high-speed train [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.
- 马元明. 高速列车制动盘激光熔覆工艺及性能研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
- [10] Guo G L. Strengthening mechanism of Ni-based composite coating on carbon steel prepared by argon arc cladding [J]. *Hot Working Technology*, 2013, 42(16): 152-154.
- 郭国林. 碳钢表面氩弧熔覆镍基复合涂层的强化机制 [J]. *热加工工艺*, 2013, 42(16): 152-154.
- [11] Guo Y, Zhou R C, Hou S F, et al. Precipitates and strengthening mechanism in Ni-based alloys [J]. *Heat Treatment of Metals*, 2011, 36(7): 46-50.
- 郭岩, 周荣灿, 侯淑芳, 等. 镍基合金的析出相及强化机制 [J]. *金属热处理*, 2011, 36(7): 46-50.
- [12] Zhao Z K. Metal materials science and heat treatment technology [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011.
- 赵忠魁. 金属材料学及热处理技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.
- [13] Cai C B, Li M Y, Han B, et al. Numerical simulation iron-based cladding coating with wide-band laser at different preheating temperatures [J]. *Applied Laser*, 2017, 37(1): 66-71.
- 蔡春波, 李美艳, 韩彬, 等. 不同预热温度下宽带激光熔覆铁基涂层数值模拟 [J]. *应用激光*, 2017, 37(1): 66-71.